

УДК 621.311:681.5

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О. І. Кіянчук***ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727172,  
e-mail: ghladj@ukr.net*

*Проведено аналіз засобів контролю параметрів якості електроенергії відновлювальних джерел енергії. Запропоновано розроблені функції аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів нетрадиційної енергетики за допомогою інформаційно-вимірювального апаратно-програмного комплексу. Наведено основні та додаткові параметри для аналізу продуктивності електротехнічних комплексів з відновлювальними джерелами та сонячні електровимірювальні прилади моніторингу. Досліджено важливість розрахунку економічної доцільності застосування додаткових функцій моніторингу для сонячних електростанцій різної потужності та регулювання балансу реактивної потужності приватних джерел генерації. Розроблено підпрограму пофрагментної обробки сигналу та розрахунку коефіцієнтів несиметрії напруг та струмів. Побудовано графіки зміни коефіцієнтів гармонік струмів та напруг на затискачах підстанції сонячної електростанції прикарпатського регіону. Введено коефіцієнт врахування впливу на енергосистему та сумарну енергоефективність.*

**Ключові слова:** сонячна електростанція, інвертори, показники якості, електромагнітна сумісність, стійкість енергосистеми, реактивна потужність, енергоефективність, енергоемність.

*Проведен анализ средств контроля параметров качества электроэнергии возобновляемых источников энергии. Предложены разработанные функции анализа режимов работы электротехнических комплексов нетрадиционной энергетики с помощью информационно-измерительного аппаратно-програмного комплекса. Приведены основные и дополнительные параметры для анализа производительности электротехнических комплексов с возобновляемыми источниками и солнечные электроизмерительные приборы мониторинга. Исследована важность расчета экономической целесообразности применения дополнительных функций мониторинга для солнечных электростанций различной мощности и регулирования баланса реактивной мощности частных источников генерации. Разработана подпрограмма пофрагментной обработки сигнала и расчета коэффициентов несимметрии напряжений и токов. Построены графики изменения коэффициентов гармоник токов и напряжений на зажимах подстанции солнечной электростанции Прикарпатского региона. Введен коэффициент учета влияния на энергосистему и суммарную энергоэффективность.*

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, инверторы, показатели качества, электромагнитная совместимость, устойчивость энергосистемы, реактивная мощность, энергоэффективность, энергоемкость.

*Analysis of the control means of electric energy quality parameters of renewable energy sources was conducted. Developed analysis functions of alternative energy electro-technical complexes' operation modes with the help of information and measuring hardware and software complex were suggested. Basic and additional parameters to analyze the performance of electro-technical complexes with renewable sources and solar electrical measuring monitoring devices were provided. The importance of calculating the economic efficiency of additional monitoring functions application for solar power plants of various capacities and regulating the reactive power balance of the private generation sources was investigated. The subroutine for fragment signal processing and calculating of asymmetry voltages and currents coefficients was developed. The graphs of harmonic currents and voltages coefficients at the terminals of the Precarpathian region solar power plant substation were constructed. The coefficient that accounts the impact on the energy system and total energy efficiency was introduced.*

**Key words:** solar power plant, inverters, quality indicators, electromagnetic compatibility, power system stability, reactive power, energy efficiency, energy capacity.

### Вступ

Збільшення частки екологічно чистих джерел генерації є стратегічно важливим напрямком української держави. Вироблена електроенергія, яку генерують сонячні та вітрові електростанції в енергосистему, має відповідати чинним стандартам якості та електромагнітної сумісності. Крім того, велике значення має місце підключення джерел локальної генерації, їх потужність, кількість та режим роботи, що впливає на параметри елементів енергосистеми та їх енергоефективність. Вирішення задачі узгодження параметрів електротехнічних комплексів, що містять джерело локальної генерації нетрадиційної енергетики дасть змогу покращити роботу електротехнічного обладнання,

систем релейного захисту та автоматики, підвищити надійність елементів енергосистеми. Важливу роль для інтеграції сонячних та вітрових електростанцій в енергосистему відіграє можливість компенсації реактивної потужності інверторами, що дає змогу оператору енергосистеми маневрувати між загальноприйнятими способами керування та новими додатковими функціями генерації нетрадиційної енергії.

### Актуальність і невирішені питання

Поступове збільшення сумарної генерованої потужності відновлюваними джерелами в енергосистемі спонукає до вирішення питань підвищення енергоефективності сонячних та вітрових електростанцій, що пов'язане з за-

вданням моніторингу. Доступ до повної інформації про генерацію та параметри показників якості електроенергії є одним з найважливіших питань для власника електротехнічного комплексу, але функції моніторингу таких об'єктів значно відрізняються та залежать від потужності, класу генерації та фінансових можливостей власника джерела генерації. На даний час існує чимало різноманітних технологій, що забезпечують доступ до інформації, але питання про перелік необхідних параметрів моніторингу залишається відкритим.

Розвиток інноваційних технологій в сфері сонячної та вітрової енергетики відбувається паралельно з еволюцією Інтернету і комп'ютерних систем, що пов'язано також з розвитком інверторних технологій. Зокрема, на сонячній електростанції в селі Радче Івано-Франківської області використані інвертори Fronius. Даний виробник інверторів дає можливість створити безкоштовний зв'язок з інвертором при підключенні до Інтернету через Wi-Fi. Дані моніторингу таких фотоелектричних систем можна відправляти на веб-платформи і програми для зручного доступу та огляду клієнтів. Цей продукт може бути встановлений в інвертори, що дозволяє прискорити з'єднання і надає можливість для автоматичного порівняння прибутковості по декількох інверторах або періодах часу та зручного управління.

Додатковою проблемою сонячних електростанцій є непрогнозовані збої, що наносять власникам чималих збитків, особливо якщо залишаються непоміченими протягом тривалого часу. Сучасне обладнання моніторингу може допомогти запобігти падінню прибутковості і пропонує ряд корисних додаткових функцій, які роблять експлуатацію сонячної електростанції ще більш рентабельною. Система також може бути налаштована так, що власник отримає інформацію про будь-які несправності, автоматично виправить помилку та зменшить втрати свого генеруючого підприємства [1].

Перспективним напрямком дослідження також вважається можливість підвищення енергоефективності системи електропостачання та оптимізації енергетичних процесів шляхом оптимізації режимів споживання та відбору потужності для зменшення вартості необхідного встановленого обладнання, терміну окупності інвестицій при заданій якості електроенергії [2].

### **Постановка завдання**

Метою цієї роботи було проведення аналізу засобів контролю якості електроенергії, виробленої сонячними та вітровими електростанціями, які використовують у світі і в Україні, та запропонувати розроблені функції аналізу режимів роботи електротехнічних комплексів нетрадиційної енергетики за допомогою інформаційно-вимірювального апаратно-програмного комплексу (ІВАПК), який розроблено на кафедрі електропостачання та електрообладнання промислових підприємств ІФНТУНГ. Підвищення енергоефективності та якості електро-

енергії електротехнічного комплексу дає можливість збільшити прибуток від джерела генерації та покращити маневровість енергосистеми.

### **Результати**

Розвиток інтелектуальних мереж Smart Grid поєднав властивості великих і малих енергетичних систем з пристроями силової електроніки та мікропроцесорних систем керування, що забезпечують відстеження стану об'єкта шляхом безперервного моніторингу параметрів процесів. Підтримання необхідного рівня енергозабезпечення ліній електропередач у режимі паралельної роботи з мережею є складним процесом і потребує узгодження по багатьох параметрах електроенергії. Для конкретної системи при порушенні оптимального режиму роботи через наявність амплітуд вищих гармонік та зміну напрямків перетоків може виникнути порушення стійкості локальної системи [3].

Оскільки вихідна потужність сонячної батареї залежить від екологічних факторів, таких як сонячна радіація і температура, потрібно розуміти, що продуктивність системи корелюється від необхідних екологічних даних. З даних моніторингу користувачі можуть зрозуміти тенденції, які впливають на сонячну продуктивність та ефективність, і вони можуть використовувати ці дані для оптимізації роботи сонячного комплексу і технічного обслуговування.

Завдання моніторингу сонячної генерації:

- діагностика проблем продуктивності фотоелементів або інвертора;
- оптимізація експлуатації та технічне обслуговування сонячних комплексів;
- оцінка довгострокової надійності системи та час напрацювання на відмову (тобто довгострокова надійність і продуктивність, інтенсивність відмов інвертора);
- оцінка впливу дизайну сонячної електростанції на продуктивність;
- аудит виробництва енергії.

Сонячні давачі освітленості дозволяють системі моніторингу вимірювати кількість сонячного світла, які отримують сонячні панелі. Важливим параметром моніторингу є відстеження температури сонячних батарей, оскільки продуктивність виробництва електроенергії також залежить від цього параметра. Порівнюючи очікувану вихідну потужність системи та отриману потужність, обчислюють показники ефективності. Зменшення даних показників зазвичай вказує на проблему, яка повинна бути оцінена обслуговуючим персоналом сонячного комплексу. Ще однією ключовою частиною моніторингу сонячної системи для контролю ефективності, продуктивності і надійності сонячних інверторів є аналіз роботи інверторів. Сонячні системи моніторингу зазвичай включають в себе інтерфейс клієнта, який доступний для веб-браузера та смарт-телефонів, що забезпечує легкий доступ до поточних і загальних даних для сонячної системи.

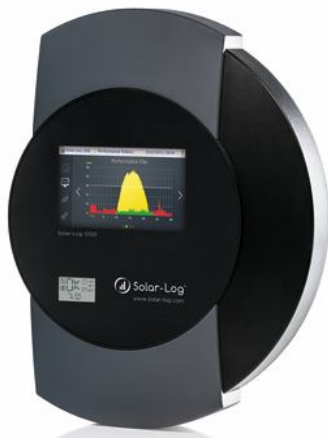


Рисунок 1 – Інтерфейс системи контролю параметрів електроенергії Solar-Log

При використанні стартового комплексу для демонстрації системи моніторингу сонячної електростанції можна аналізувати отримані дані і автоматично попереджувати оператора електронною поштою, якщо тенденції вказують на несподіване зниження виробництва електроенергії. Система включає в себе сонячні панелі, акумуляторні батареї, інвертор, реле керування навантаженням і інше адаптоване обладнання для контролю та автоматичної роботи даного джерела генерації. Основною перевагою цієї системи є її відкритість і адаптованість для задоволення конкретних технічних вимог операторів сонячного генерування. Графічна мова програмування LabVIEW надає широкий спектр інструментів для математичної обробки сигналу і для зазначених діагностичних цілей.

Повна система сонячного моніторингу буде вимірювати фактори навколишнього середовища, необхідні для розрахунку очікуваного виробництва сонячної енергії та моніторингу фактичної потужності електротехнічного комплексу. Відмінністю між стартовою та повною версією даної системи є ціна, що вплине на сумарну вартість обладнання, собівартість виробленої електроенергії та термін окупності, а тому варто економічно обґрунтовувати вплив розширених функцій на підвищення енергоефективності системи [4]. Нижче представлена блок-схема типової системи сонячної моніторингу, в тому числі давачів, приладів вузлів, контролера заряду батареї і інвертора.

Сонячні електростанції потужністю до 100 кВА можуть використовувати систему аналізу з двома дисплеями: великий кольоровий сенсорний екран і менший РК-дисплей для повідомлень про стан. Маючи ці дисплеї, власник джерела генерації або адміністратор може переглянути всю інформацію про роботу підприємства, енергоспоживання і отримати достатній аналіз структури виробленої електроенергії безпосередньо на пристрої без ПК.

Завдяки сучасним засобам контролю оператори електростанції локальної генерації мають можливість використати інформацію вимірювань не тільки для виявлення порушення, а для обчислення поточної кількості сонячної потужності на виході, загальну кількість виробленої електроенергії для конкретного дня, місяця або року, а також загальну кількість виробленої електроенергії підприємства. Програми звітності можуть показувати прибуток від джерела генерації в обраній валюті і скільки вики-



Рисунок 2 – Блок-схема типової системи сонячної моніторингу

дів  $\text{CO}_2$  було зменшено за допомогою сонячної генерації в порівнянні з тепловими електростанціями. Для більшої зручності, деякі реєстратори даних дозволяють підключити пристрій моніторингу до Інтернету через модем або додаткову бездротову карту, а також для перегляду аналізу на великому екрані в домашніх умовах. Дані також можуть відображатися на домашній сторінці веб-сайту, а це означає, що інформація може бути доступна цілодобово з будь-якої точки світу. Програми для мобільних пристроїв, таких як айфонів доступні вже зараз. Онлайн перегляд може також показати температурні характеристики інвертора, сонячного фотомодуля та навколишнього середовища [4]. Для відображення ефективності підприємства локальної генерації ці опції є дуже зручними і корисними.



Рисунок 3 – Програми відображення параметрів сонячної електростанції на мобільних пристроях та на комп'ютері

В провідних країнах світу велику увагу приділяють функції безпосереднього керування джерелом генерації з будь-якого місця перебування власника об'єкту. Стандартизований обмін даними між операторами сітки і децентралізованих генеруючих станцій в майбутньому буде регулюватися законом відповідно до ІЕС норми 61850. Норма визначає загальний протокол передачі для електричних комутаційних систем. Оскільки, недостатньо вчасне виявлення несправності на електростанції зумовлюють зменшення прибутку від генерації, то з новими технологіями система повідомлятиме оператора про несправність і дозволить виправляти незначні пошкодження через смартфон. Основні причини несправностей можуть бути численні і різноманітні (пошкодження від гризунів, тінь, перегрівання інвертора). З додатковим вимірником потужності, який передає енергоспоживання в реєстраторі даних, деякі пристрої здатні

також управляти і оптимізувати споживання продукції власного виробництва. Такі системи моніторингу мають можливість автоматично вмикати електричні прилади. Техніка може бути ввімкнена або вимкнена залежно від кількості енергії, що виробляється. Наприклад, водонагрівачі можна ввімкнути, коли живлення виробляється і залишається активним протягом усього дня. Якщо виробничі потужності будуть збільшуватися, то додаткові прилади можуть бути автоматично ввімкнені (наприклад, кондиціонери). На рисунку 4 показано графіки виробництва і споживання електроенергії за місяць та добу на затискачах підстанції сонячної електростанції, які дозволяють оптимізувати технологічний процес. Виробництво на графіках відображено жовтим кольором, споживання червоним.

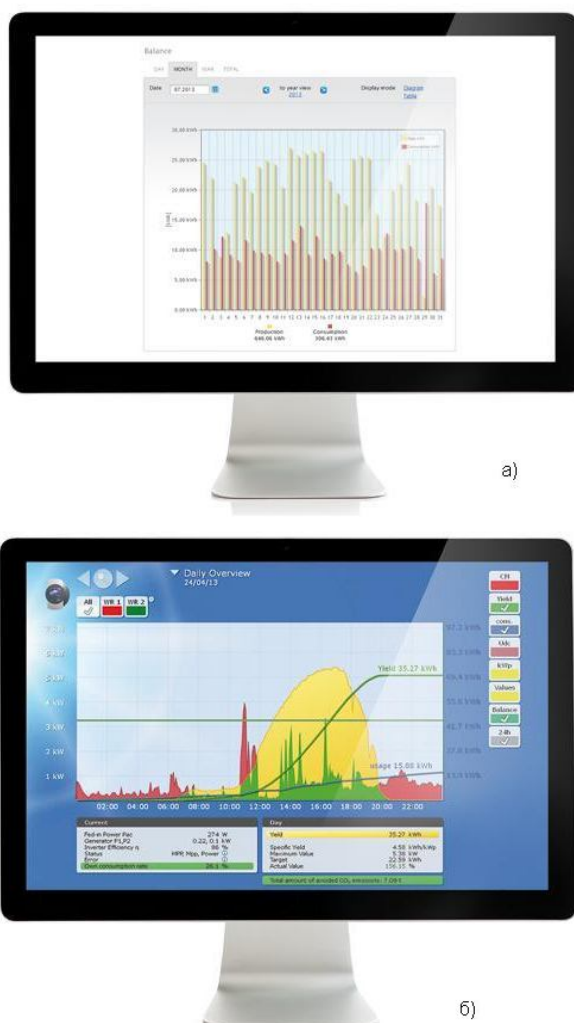


Рисунок 4 – Графіки виробництва електроенергії на дисплеї за місяць (а) та за добу (б) на затискачах підстанції сонячної електростанції

З початку 2012 року в Німеччині набрали чинності нові правила контролю за живленням та споживанням електроенергії. Комунальні підприємства тепер мають можливість вільного доступу до генерації електроенергії приватними джерелами генерації. Згідно з цими прави-



лами використовується технологія особливого контролю для стабілізації роботи мережі. Крім того, велика увага приділяється можливості регулювання балансу реактивної потужності приватних джерел генерації. Звичайно, інвертор повинен підтримувати можливість управління реактивної потужності. Багато джерел генерації нетрадиційної енергетики також вимагають зворотний зв'язок між фактичними значеннями реактивної потужності всіх підключених джерел, що дозволяє стабілізувати мережу. Функції керування живленням також може бути налаштованим таким чином, щоб певний відсоток потужності передавався в мережу, а інша частина електроенергії була доступна для промислового або побутового власного споживання. Щоденне зведення даних допомагає керувати генерацією з презентацією балансу виробітку та енергоспоживання, яке отримує енергосистема, відображаючи споживання (червоний колір на графіку), виробництво електроенергії (жовтий) і різницю споживаної потужності (зелений). Даний контроль балансу електроенергії виробництва та власного споживання особливо важливий в періоди пікових навантажень, що дозволяє зменшити навантаження на енергосистему [4].

Велику роботу в питаннях розширення опцій контролю за роботою електротехнічних комплексів з відновлювальними джерелами виконує компанія National Instruments.

Як показано на рисунку 5, компанія National Instruments використовує бездротові мережеві давачі (WSN), вузли для контролю потоку сонячного випромінювання, панелі температури навколишнього середовища, швидкості та напрямку вітру. Система має також вбудовану функцію управління та збору, виконує високошвидкісний моніторинг і аналіз напруги і струму мережі змінного струму, панелей, акумуляторних батарей, і аналізує сигнал навантажень. Вона також включає в себе модуль реле для управління навантаженням. Система CompactRIO працює в середовищі LabVIEW в реальному часі, збирає дані з бездротової сенсорної мережі, виконує облік електроенергії та аналіз якості, і відправляє дані оператору. При реєстрації даних модуль диспетчерського управління (LabVIEW DSC) виступає як реєстратор даних. Модуль DSC LabVIEW містить інструменти для запису бази даних в режимі реального часу та основних сигналів і подій керування в одну повну систему [5].

Розроблені стартові програмні комплекси в середовищі LabVIEW досить доступні для аналізу роботи таких джерел генерації, але збільшення обсягу параметрів контролю потребує додаткових підпрограм і витрат на їх розроблення. Такі підпрограми можуть бути розроблені програмістами, розширена система сонячного моніторингу не готова до запуску під ключ. Код підпрограм може відкрито розширюватися і змінюватися для задоволення конкретних потреб вашої програми.



**Рисунок 5 – Система обліку параметрів генерації сонячної електростанції**

Електрична система аналізу потужності буде вимірювати напруги і струми постійного і змінного струму і обчислить миттєву потужність (кВт) і загальний обсяг виробництва енергії (кВт·год). Крім того, система може обчислити коефіцієнт потужності та показники якості електроенергії змінного струму, отриманого від інвертора. Спеціальними службовими програмами можна також здійснити моніторинг температури і стану інвертора, ефективність перетворювача, використання електротехнічного комплексу, коефіцієнт потужності, гармоніки, спотворення кривої струму чи напруги, перехідні характеристики в ненормальних умовах мережі, але для цього потрібно придбати за додаткові кошти підпрограми аналізу, або спробувати самим їх розробити в середовищі LabVIEW. У випадку, якщо електротехнічний комплекс включає в себе акумуляторні батареї, система може також контролювати рівні напруги батареї, струму, температури і заряду. Вимірювання показників навколишнього середовища також важливі в системі сонячного моніторингу, так як вони дозволяють визначити очікувану продуктивність системи. Ключові фактори навколишнього середовища сонячного

Таблиця 1 - Сонячні електровимірювальні прилади моніторингу стану навколишнього середовища

Вимірювання	Стандартний перетворювач	Типовий сигнал	Типове устаткування
сонячне випромінювання	Пірометр	Аналогова напруга	WSN-321x аналоговий вхід C-серії
швидкість вітру	Анемометр	Імпульсний сигнал	WSN-321x аналоговий вхід C-серії
напрямок вітру	Анемометр	Аналоговий Опір	WSN-321x аналоговий вхід C-серії
температура навколишнього середовища	Термопара	Аналогова напруга	WSN-321x аналоговий вхід C-серії
панель			
температура панелей	Термопара	Аналогова напруга	WSN-321x аналоговий вхід C-серії

випромінювання включають вимірювання температури навколишнього середовища і сонячної панелі. Система екологічного моніторингу може також включати швидкість вітру, напрямки і вологість. Вузли бездротової мережі дачів (WSN) забезпечують ідеальну платформу для сонячного моніторингу навколишнього середовища. Залежно від вимог додатка, дачі можуть бути розташовані на поверхні кожного модуля кожного ряду панелей.

**Аналіз продуктивності.** До найбільш важливих чинників, які впливають на сонячну продуктивність, відносяться сонячна доступність, температура масиву, масив забруднення, сонячний спектральний хід і кут падіння сонячних променів. Сонячна система моніторингу може забезпечити дані, які отримані при відстеженні, завдяки чому можна визначити причину погіршення продуктивності. Ці дані також можуть бути використані для економічного аналізу, наприклад, аналізу витрат на піку потужності, які визначають кінцевим співвідношенням отриманого доходу до величини потужності. Деякі типові заходи аналізу продуктивності перераховані нижче. До показників ефективності системи належать: коефіцієнт використання встановленої потужності, ефективність системи, доступність, вартість, індекс продуктивності, використання сонячного комплексу, вартість пікової потужності (\$/WP), «кінцевий вихід системи» або «питомий вихід», «індекс продуктивності». Додатковими факторами моніторингу є сонячна доступність, температурний режим, забруднення та затінення, сонячний спектральний хід, кут падіння сонячних променів, ефективність інвертора, орієнтація панелей при монтажі, точність відстеження сонячних променів.

Моніторинг сонячних установок дозволяє операторам максимально реалізувати питання доходу і зниження витрат на експлуатацію та обслуговування електрообладнання. Програма моніторингу сонячної установки переважно включає в себе стартовий комплект в середовищі LabVIEW, що передбачає програмний код, який за необхідності можна використовувати

як відправну точку для побудови системи сонячного моніторингу з використанням бездротової мережі та National Instruments (WSN). У прикладі додатка CompactRIO, зображено один або кілька вузлів моніторингу сонячної освітленості, температури панелі і погодних умов. Додаток CompactRIO відстежує і аналізує зміну постійного електричного живлення і як діє зміна цих даних на параметри вузлів. DSC виступає як сервер даних для системи сонячного моніторингу та відображає тенденції для аналізу продуктивності системи та інтелектуальної диспетчеризації.

Моніторинг може допомогти оператору джерела сонячної генерації переконатися, що вони отримують найбільшу віддачу від інвестицій в сонячну електростанцію. Для багатьох операторів диспетчерська підтримка сонячної установки є відносно новою і потребує детального аналізу.

Якщо ви працюєте з невеликою сонячною установкою масштабу приватного будинку, системи моніторингу можуть забезпечити великий обсяг інформації, щоб допомогти вам отримати виробництво сонячної енергії з максимальною продуктивністю. Наприклад, спільною операційною проблемою для сонячних сільськогосподарських електротехнічних комплексів є належне планування очищення сонячної панелі. Сонячна система моніторингу може виявити, коли забруднення з панелей - викликане пилом, брудом чи сміттям - зменшує кількість вироблення електроенергії. Це дозволяє операторам більш розумно планувати очищення апаратного комплексу.

Проте, часто менш потужні джерела генерації відновлюваної енергії (наприклад, в приватних будинках потужністю менше 100 кВт) не потребують таких значних капіталовкладень в систему аналізу даних, всю інформацію про вироблення електроенергії можна зчитати з лічильника, який заплomboваний та не має можливості доступу та підключення, та системи ЛУЗОД. Оператор має можливість бачити результати роботи обраного джерела генерації за допомогою доступної програми Енергоцентр,

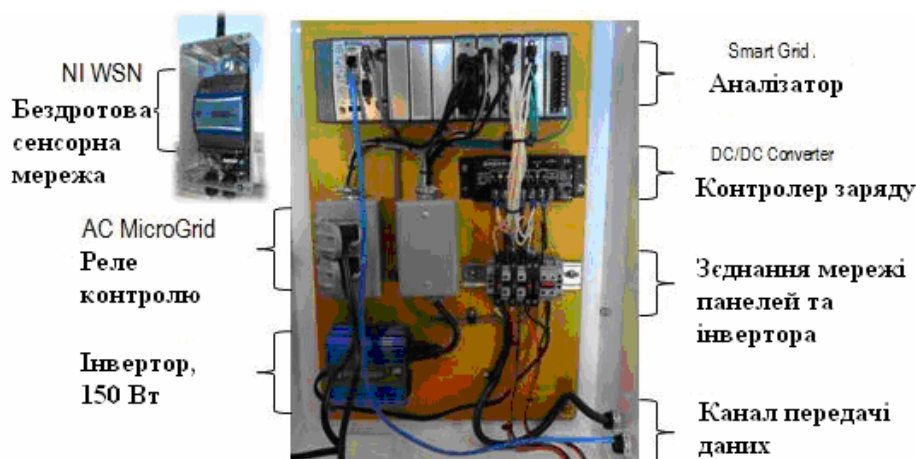


Рисунок 6 – Вузли моніторингу компанії National Instruments

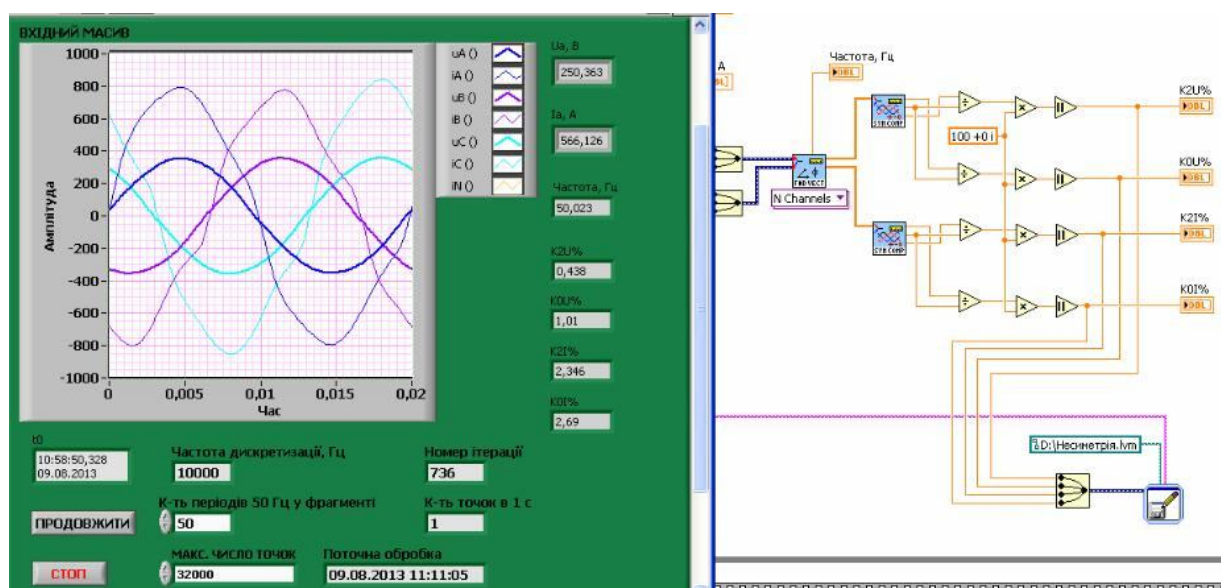


Рисунок 7 – Підпрограма пофрагментної обробки сигналу та розрахунку коефіцієнтів несиметрії в середовищі LabVIEW

яка дає можливість переглядати дані про споживання за різні проміжки часу (як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків); переглядати журнал подій в системі, редагувати інфраструктуру системи та формувати різноманітні звіти в середовищі Excel.

Середовище LabVIEW може бути використане також в переносному аналізаторі якості напруги та електроспоживання, який з допомогою різноманітних підпрограм може не тільки вимірювати миттєві значення струмів і напруг, а й виконувати більш повний аналіз, такий як, розрахунок показників електромагнітної сумісності (коефіцієнт пульсації, коефіцієнт несинусоїдальності, коефіцієнт  $n$ -ої гармонічної складової напруги, коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності). Використання переносних аналізаторів дає можливість не витратити кошти на дороге обладнання для аналізу додаткових параметрів системи при малих потужностях джерела генерації. Також розроблені підпрограми можуть спрогнозувати

доцільні потужності електростанції, які варто підключати до енергосистеми з вищою ефективністю та меншими втратами. На рисунку 7 зображено розроблену нами підпрограму пофрагментної обробки сигналу та розрахунку коефіцієнтів несиметрії напруг та струмів, яку було використано для аналізу якості електроенергії, що виробляється сонячною електростанцією в селі Радче [6].

Дана підпрограма дозволяє відстежити коефіцієнти несиметрії гармонічних складових напруг та струмів, які виникають на шинах підстанції сонячної електростанції.

При вимірюваннях на затискачах підстанції сонячної електростанції коефіцієнт несиметрії струму на вводі силового трансформатора ТП 10/0,4 кВ досягав в окремі періоди доби 17%. При цьому коефіцієнт несиметрії напруг не перевищував 5%.

За необхідності можна також розробити підпрограми, які б розраховували основні показники ефективності: енергоефективність, енер-



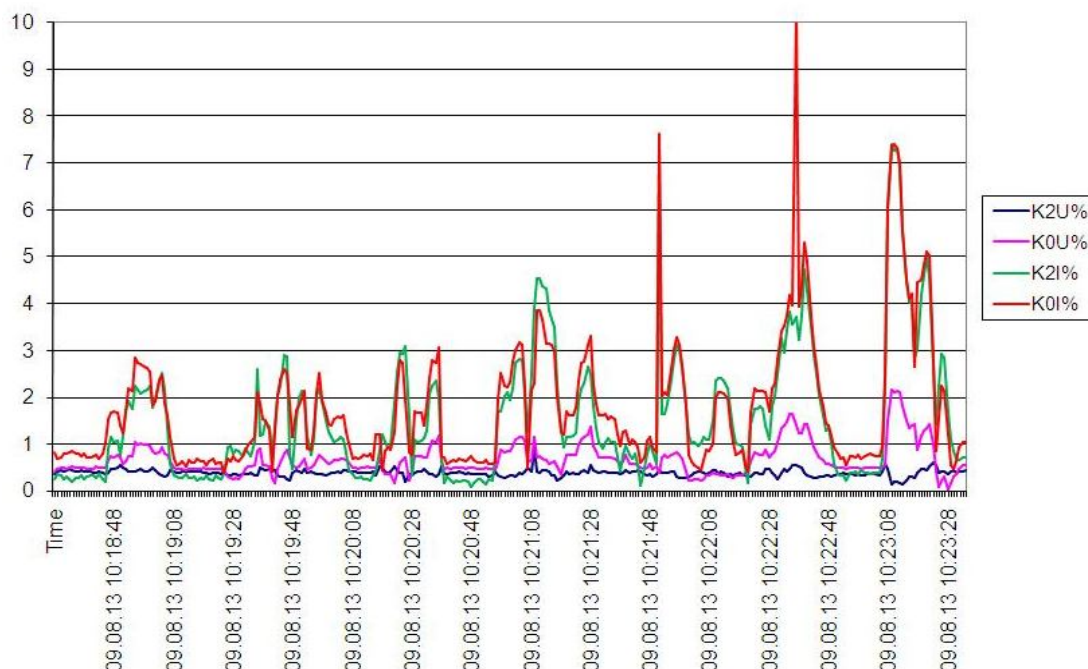


Рисунок 8 – Графік зміни коефіцієнтів несиметрії струмів та напруг на затискачах підстанції сонячної електростанції

гоємність, чисту поточну вартість NPV, що являє собою різницю дисконтованих на один момент часу показників прибутку та інвестиційних витрат по деякому проекту, а також розраховувати показники сумісної роботи енергосистеми з відновлювальними джерелами.

Ці показники необхідні також для планування оптимальних потужностей і розмірів фотоелектричних систем. Європейці використовують крім звичайних показників продуктивності (наприклад,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta_{MPPT}$ , коефіцієнти гармонічних спотворень) статичний коефіцієнт ефективності [8]

$$\eta_{MPPT} = \frac{1}{P_{MPP} \cdot t_M} \int_0^{t_M} U_A(t) \cdot i_A(t) dt, \quad (1)$$

де  $U_A(t), i_A(t)$  - напруга та струм на виході перетворювача;

$t_M$  - тривалість вимірювання (початок в  $t = 0$ , рекомендовано від 60 до 300 секунд;

$P_{MPP}$  - максимальна потужність при генерації енергії фотоелементами при визначеній напрузі.

З трохи більш фундаментального розгляду можна розглядати загальну ефективність сонячної системи. Для сонячних модулів ефективність вироблення потужності залежить від поточного глобального освітленості  $G$  і температури  $T$  та певна доступна потужність  $P_{MPP}$ .

$$P_{DC} = \eta_{MPPT} \cdot P_{MPP}. \quad (2)$$

Інвертор використовується в стаціонарному режимі

$$P_{AC} = \eta_{inv} \cdot P_{DC}, \quad (3)$$

звідси знайдемо сумарний коефіцієнт ефективності:

$$\eta_{TOT} = \eta_{inv} \cdot \eta_{MPPT} = \frac{P_{AC}}{P_{MPPT}}. \quad (4)$$

Також запропоновано визначати динамічний коефіцієнт ефективності

$$\eta_{MPPT} = \frac{1}{\sum P_{MPPi} \cdot T_{Mi}} \int_0^{T_M} U_A(t) \cdot i_A(t) dt, \quad (5)$$

при цьому  $\sum P_{MPPi} \cdot T_{Mi}$  - сума різних енергій MPP, які можуть бути поглинені в оптимальних умовах на різних рівнях потужності,  $T_{Mi}$  - час, при якому кожен з сонячних фотомодулів працює з максимально ефективною потужністю.

Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу з відновлювальними джерелами має бути комплексним і враховувати ефективну роботу сонячних фотомодулів, інверторів і вплив таких джерел генерації на роботу електромережі за допомогою коефіцієнтів стабільності та енергозабезпеченості [9], а також коефіцієнтів електромагнітної сумісності.

## Висновки

1. Для підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу з відновлювальними джерелами потрібно визначати комплексний показник з врахуванням роботи сонячної електростанції та її впливу на роботу електромережі.

2. Використання ІВ АПК дає змогу в реальному часі проводити експериментальні дослідження енергетичних параметрів та показників якості електроенергії сонячних електростанцій для розроблення заходів підвищення ефективності роботи сонячної електростанції в енергосистемі.



**Література**

- 1 Fronius International [Online]. Available: <http://www.fronius.com>
- 2 Денисюк С. П. Оптимальний відбір потужності в системах електроснабження. [Текст] / Денисюк С. П., Базюк Т. М. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 50 – 58.
- 3 Деревянко Д. Г. Особливості оцінки запасу стійкості локальних систем з різномірними джерелами генерації [Текст] / Д. Г. Деревянко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. Спецвипуск. – С. 15 – 18.
- 4 Solar Power World. Direct. Solar Data Loggers. November 5, 2013. [Online]. Available: <http://www.solarpowerworldonline.com/2013/11/>
- 5 Wireless Solar Monitoring Starter Kit - National Instruments [Online]. Available: <http://www.ni.com/example/31452/en/>
- 6 Бацала Я. В. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції [Текст] / Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4(49). – С/ 81-89.
- 7 Энергетический менеджмент / А.В. Пращовник, А.И. Соловей, В.В. Прокопенко и др. – К. ИЕЕ НТУУ «КПИ», 2001. – 472 с.
- 8 Heinrich Haberin. Wirkungsgrad von Photovoltaik Wechselrichtern [Текст] / Elektrotechnik. – 2005. – No 2. – pp. 53-57.
- 9 Лежнюк П. Д. Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі [Текст] / П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, Д.С. Собчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 45-47.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
19.05.15*

*Рекомендована до друку  
професором **Костишиним В.С.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Павлюком А.В.**  
(відділ теоретичної електротехніки  
Інституту електродинаміки НАН України,  
м. Київ)*